

ビデオ透過型 HMD における視覚特性に基づく透明物体表現法

木村 勇斗 木村 朝子 柴田 史久

立命館大学大学院 情報理工学研究科

1. はじめに

拡張/複合現実感 (Augmented/Mixed Reality; AR/MR) で仮想物体の提示する際、ガラス球や液体といった透明物体は特に表現が難しい。さらには、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) のような立体視が可能なディスプレイを用いた場合、一般的なコンピュータグラフィクスにおける透明物体表現手法を適用しただけでは、HMD の機構上、実物の透明物体が持つ視覚効果が十分に再現されない。

人間が実物の透明物体を観察する際、物体表面に描かれている文字などの模様 (以下、表面像) に注視することができ、また、物体を通して歪んだ実世界 (以下、屈折像) を注視することもできる。この時、人間は注視する像が網膜上に鮮明に映し出されるように両眼を輻輳させ、水晶体を調節する。しかし、一般的な手法で表現された仮想透明物体を HMD で提示した場合、計算コストの問題から各像の視差量は等しく表現され、輻輳を適切に行うことができない。さらには、HMD のディスプレイの特性上、水晶体の調節位置は常にスクリーン上に固定される。これらの理由により、仮想透明物体は観察者の注視対象に関わらず常に一定に表現され、実物のような視覚効果は得られない。

そこで本研究では、観察者の視線情報に基づき視覚効果を疑似的に再現し、実物と仮想透明物体の視覚的な不整合性を緩和する。ポリゴンベースの低コストの屈折計算アルゴリズムにより各像の視差を再現し、さらには、注視対象に応じて眼球モデルに基づき適切にぼかし処理を施すことにより、水晶体の焦点ボケを再現する。

2. 輻輳と調節による視覚効果の再現

透明物体を観察する際、表面像や屈折像といった複数の奥行き異なる像が同時に観察される。観察者は各像を選択的に注視することが可能であり、注視対象に合わせて両眼の輻輳と調節を行う。この時、注視対象以外の像にはこれらの眼球運動により視覚効果が発生する。例え

ば、透明物体の表面像に注視した場合、屈折像には輻輳点が合っていないため像のズレが生じ、さらには、調節位置が合っていないことから像のボケが生じる。

本手法では、ビデオ透過型 HMD において、観察者の視線情報を用いて、輻輳によるズレと調節によるボケを疑似的に再現する。

2.1 輻輳によるズレの再現

ズレの計算モデルを図 1 に示す。ポリゴンの法線ベクトルを \mathbf{N} 、視点方向ベクトルを \mathbf{V} 、物体の相対屈折率を n とすると、スネルの法則を用いて屈折ベクトル \mathbf{T} は次のように求められる。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\sqrt{n^2 \|\mathbf{V}\|^2 - \|\mathbf{N} + \mathbf{V}\|^2}} (\mathbf{N} + \mathbf{V}) - \mathbf{N} \quad (1)$$

以上のように、両眼それぞれで各ポリゴンの屈折方向を求め、実世界の背景との交点 (u_c, v_c) をサンプリングすることで像のズレを再現する。

2.2 調節によるボケの再現

ボケの計算モデルを図 2 に示す。透明物体の色情報を C_s 、屈折像の色情報を C_b とすると、HMD が出力する色情報 C_o は透明度 α を用いたアルファブレンディングで求められる。

$$C_o = \alpha C_s + (1 - \alpha) C_b \quad (2)$$

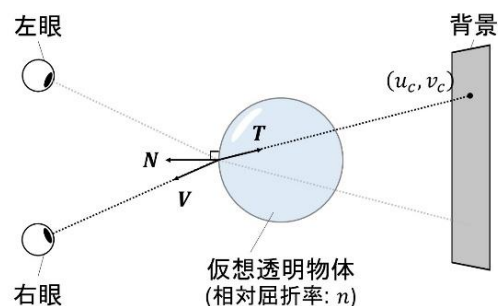


図 1 輻輳によるズレの計算モデル

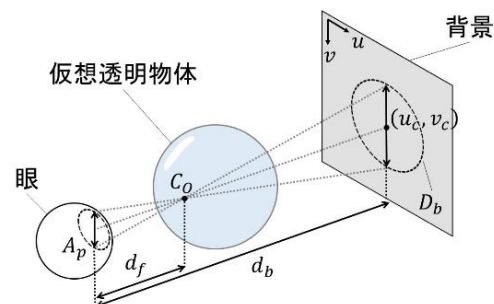


図 2 調節によるボケの計算モデル

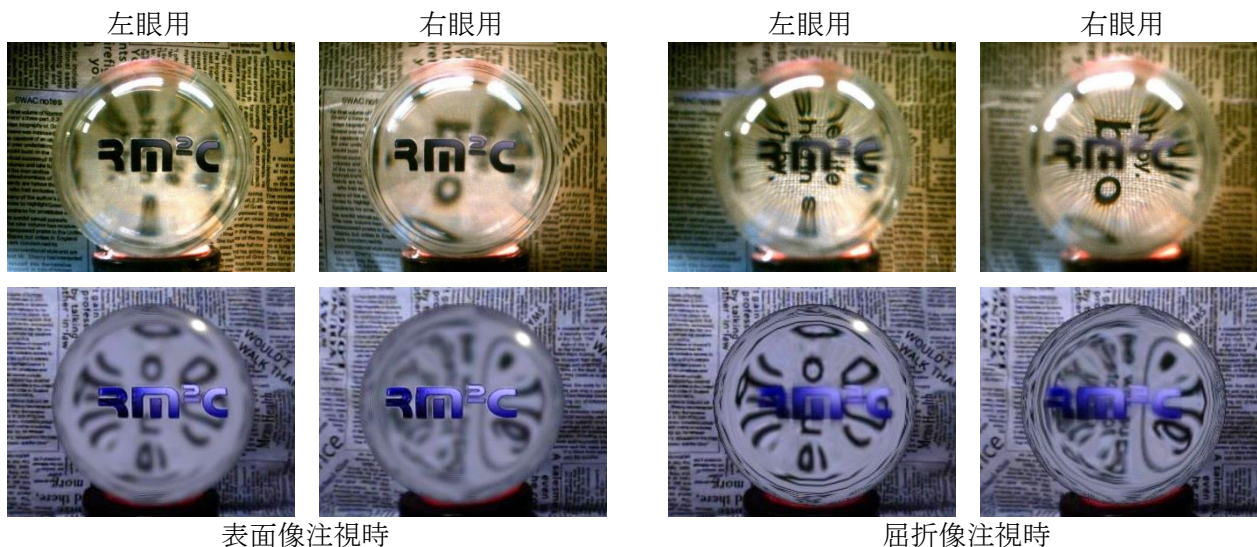


図3 実物のガラス球の結果（上段）と本手法で表現したガラス球の結果（下段）

図2に示すように、観察者が透明物体の表面を注視する場合、Navarroら[1]によって提案されている眼球光学系モデルを用い、 C_b は2次元ガウス関数の畳み込み演算によりぼかし処理を施す。

$$C_b = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_i^{K_g} \sum_j^{K_g} \exp\left(-\frac{(u_i^2 + v_j^2)}{2\sigma^2}\right) C(u_i, v_j) \quad (3)$$

ここで、 σ^2 はガウス関数の分散であり、カーネルサイズ K_g の半数と定義する。観察者の瞳孔直径を A_p 、眼の位置から背景までの距離を d_b 、焦点までの距離を d_f とすると、 K_g は以下の式で求まる。

$$K_g = A_p \frac{|d_b - d_f|}{d_f} \quad (4)$$

これらの処理を両眼それぞれで行うことで、調節によるボケを再現する。

3. 実験

3.1 実験内容

透明物体としてガラス球を想定し、実物と本手法で表現した仮想物体を比較する。ビデオ透過型HMDとして、HTC社のVIVE Pro Eyeを使用した。また、観察者の視線情報は、HMDに搭載されている視線検出器により取得した（検出レート、片眼90 Hz）。透明物体のレンダリングにはUnity、シェーディングにはCg/HLSLを用いた。ガラス球は、実物と仮想共に直径150 mm、相対屈折率1.51、稠密である。また、表面注視の手掛かりとして、表面にテクスチャを貼付した。観察者の瞳孔直径は、実時間計測が困難であるため、人間の瞳孔直径の可動域と、実験環境に明るさに基づいて6.0 mmと設定した[2]。

3.2 実験結果と考察

実験結果を図3に示す。実物体は平均的な瞳孔間距離65 mmの距離を隔てたステレオカメラで撮影した結果である。対して、仮想物体は計算機によりHMDに出力された結果である。実物のガラス球は、表面像と奥行きが異なることから、両眼のカメラ間で像のズレが発生し、さらにはレンズの被写界深度によるボケが発生していることが分かる。また、本手法で表現した仮想のガラス球においても、両眼で屈折像のパターンが異なり像のズレが再現されており、さらには、注視対象に応じて、適切にぼかし処理が施され像のボケが再現されていることが分かる。

4. おわりに

本研究では、ビデオ透過型HMDを用いたAR/MRにおいて、観察者の視線情報を用いて実物の透明物体が持つ視覚効果を、仮想の透明物体に疑似的に再現する手法を提案した。実験では、仮想透明物体としてガラス球を表現し、実物と比較することで、本手法により注視対象に応じた視覚効果が再現可能であることが確認された。

本研究は研究費19K22882の助成を受けた。

参考文献

- [1] R. Navarro, *et al.*: “Accommodation-dependent model of the human eye with aspheric,” *The Journal of the Optical Society of America* 1985, 2.
- [2] T. Yoshitomi *et al.*: “Functional innervation and contractile properties of the human iris sphincter muscle,” *Experimental Eye Research* 1988, 46.